



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

EERO HALONEN

VECSEL-VAHVISTINPEILIEN VALMISTUS JA SIMULOINTI

Kandidaatintyö

Tarkastajat: TkT Antti Tukiainen ja
TkT Sanna Ranta
Jätetty tarkastettavaksi

TIIVISTELMÄ

EERO HALONEN:

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 32 sivua, 5 liitesivua

huhtikuu 2018

Teknis-luonnontieteellinen koulutusohjelma

Pääaine: Teknillinen fysiikka

Tarkastajat: TkT Antti Tukiainen ja TkT Sanna Ranta

Avainsanat: VECSEL, MBE, kvanttikaivo, puolijohdesimulaatio

Tämä kandidaatintyö käsittelee pinnasta emittoivan ulkoisen kaviteetin laserin (VECSEL, Vertical External-Cavity Surface-Emitting Laser) vahvistinpeilien valmistusta. Työhön kuului muun muassa puolijohderakenteiden simulointia, suunnittelua, valmistusta ja materiaali-/rakenneominaisuuksien mittausta. VECSEL-vahvistinpeilien teoriasta käydään läpi muun muassa Bragg-peilit, jotka heijastavat vahvasti tiettyä aallonpituutta, ja kvanttikaivot, joissa hyödynnetään varauksenkuljettajien energiatilojen kvanttittumista.

VECSEL-vahvistinpeilit valmistettiin molekyylisuihkuepitaksia-menetelmällä (MBE, Molecular Beam Epitaxy). MBE:ssä puolijohdekasvatus tapahtuu ultratyhjiössä kuumennetuista materiaalilähteistä lähtevien molekyylisuihkujen avulla. Valmistusprosessissa puolijohderakenteisiin syntyy kidevirheitä, jotka luokitellaan syntymisperiaatteen mukaisesti.

Työssä kehitettiin yksinkertainen ohjelma/skripti kvanttikaivojen emissioaallonpituuden arvioimiseksi. Koodi on kirjoitettu Pythonilla ja siinä on hyödynnetty avoimeen lähdekoodiin perustuvaa openbandparams-kirjastoa. Simulaatioissa voidaan esimerkiksi muuttaa kvanttikaivon lämpötilaa, puolijohdekompositiota sekä kvanttikaivon paksuutta ja arvioida näiden parametrien vaikutusta emittoituvien fotonien aallonpituuteen.

Kandidaatintyössä onnistuttiin simuloimaan puolijohdepohjaisia kvanttikaivoja, mikä on tärkeä työkalu MBE-kasvattajalle. Python osoittautui hyväksi alustaksi tälle ohjelmalle, koska openbandparams-kirjasto perustuu avoimeen lähdekoodiin ja laajentamismahdollisuudet Pythonilla ovat hyvät.

SISÄLTÖ

1. Johdanto	1
2. VECSEL-laser	2
2.1 Toimintaperiaate	2
2.2 Kokoonpano	3
3. VECSEL-vahvistinpeili	5
3.1 Alustakiteet	5
3.2 Rakenne	5
3.2.1 Bragg-peili	6
3.2.2 Aktiivialue ja ikkuna	9
4. Vahvistinpeilin kasvatus	11
4.1 Molekyyliuuhkuepitaksia	11
4.2 Kasvatusprosessit	12
5. Kvanttikaivon simulointi	13
6. Vahvistinpeilin laadun arviointi	18
6.1 Kidevirheet	18
6.2 Tummat viat	21
7. Yhteenveto	24
Lähteet	26
Liite A. VECSEL_lasing_simulator_V0.1	28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AlGaAs	Alumiinigalliumarsenidi
AlGaAs	Alumiinigalliumarsenidi
DBR	Bragg-peili (Distributed Bragg Reflector)
EHP	Elektroni-aukkopari (Electron Hole Pair)
FEL	Latausluukku (Fast Entry Lock)
GSMBE	Kaasulähteinen molekyylisuihkuepitaksia (Gas Source Molecular Beam Epitaxy)
GaAs	Galliumarsenidi
QW	Kvanttikaivo (Quantum Well)
SHG	Taajuuskahdennus (Second Harmonic Generation)
SSMBE	Kiinteälähteinen molekyylisuihkuepitaksia (Solid Source Molecular Beam Epitaxy)
Si	Pii
UHV	Ultratyhjiö (Ultra High Vacuum)
VCSEL	Pinnasta emittoiva pystykaviteettilaser (Vertical Cavity Surface-Emitting Laser)
VECSEL	Pinnasta emittoiva ulkoisen kaviteetin laser (Vertical External-Cavity Surface-Emitting Laser)
\mathbf{k}	Aaltovektori
$\Delta\varphi$	Vaihe-ero
λ	Aallonpituus
φ	Vaihe
Ψ	Aaltofunktio
π	Pii
\hbar	Diracin vakio
α, β	Sovitusparametri
ζ, κ	Aaltofunktion paikkakerroin
λ_0	Aallonpituus tyhjiössä
μ_0	Tyhjiön permeabiliteetti
θ_i	Tulokulma
μ_i, μ_t	Permeabiliteetti
θ_t	Taittumiskulma
A, χ	Aaltofunktion normalisointikerroin
E	Energia
E_{0i}, E_{0r}	Sähkökenttä

E_c	Johtavuusvyön pohjataso
E_g	Energia-aukko
E_v	Valenssivyön huipputaso
L	Laatikon/kvanttikaivon leveys
N	Monikerta
OPL	Optinen paksuus
P	Paine
R_{\perp}, R_{\parallel}	Heijastuvuus
U_0	Laatikon/kvanttikaivon syvyys
U_0	Kvanttikaivon syvyys
V	Potentiaali
a	Hilavakio
d	Fyysinen paksuus
m	Massa
m^*	Effektiivinen massa
n, n_i, n_t	Taitekerroin

1. JOHDANTO

Laserin voidaan sanoa olevan yksi merkittävimmistä teknologisista keksinnöistä. Se on mahdollistanut sekä tieteellisiä harppauksia että viihdeteollisuuden ilmiömäisen kehittymisen.

Uusia laserkonsepteja kehitetään jatkuvasti. Pinnasta emittoiva ulkoisen kaviteetin laser eli VECSEL (Vertical External-cavity Surface-Emitting Laser) on yksi viime vuosikymmenten uusista laserratkaisuista. VECSEL on optiseen injektioon pohjautuva laser, jonka toiminta perustuu puolijohdemateriaaleista valmistettuun vahvistinpeiliin. VECSEL toimii pääpiirteittäin samalla periaatteella kuin pinnasta emittoiva pystykaviteetilaser (VCSEL eli Vertical Cavity Surface-emitting Laser), mutta VECSELin tapauksessa kaviteettia ei ole integroitu vahvistinpeiliin. VECSELillä on mahdollista kattaa koko näkyvän valon spektri suoraan tai taajuuskahdentamalla (SHG eli second harmonic generation). [1]

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on opastaa lukijaa ymmärtämään VECSEL-vahvistinpeilien toimintaa ja valmistusta. Työn aikana allekirjoittanut on myös tutustunut puolijohderakenteiden simuloimiseen. Näiden simulaatioiden tulokset esitetään tässä kandidaatintyössä.

Työn alussa käsitellään VECSELiä kokonaisuutena, toisin sanoen toimivana laserina. Tämän jälkeen tarkastellaan VECSEL-vahvistinpeilin rakennetta ja toimintaa. Omana osa-alueena on myös vahvistinpeilien kasvattaminen molekyylisuihku epitaksia- eli MBE-tekniikalla, johon palaamme myöhemmin. Työn tärkein osuus on vahvistinpeilin simulaatio, jossa keskitytään kvanttikaivojen simulointiin. Simulaatio käsitellään omassa luvussaan. Työn lopussa käydään läpi menetelmät, joilla vahvistinpeilin laatua voidaan arvioida.

2. VECSEL-LASER

VECSEL koostuu useasta erilaisesta komponentista ja rakenteesta. Vahvistinpeili on vain yksi komponentti kokonaisessa VECSEL-laserissa, minkä takia on tärkeää ja oleellista, että lukija saa tarvittavan tiedon VECSEleistä. Tämä luku antaa tarvittavan tiedon lukijalle.

2.1 Toimintaperiaate

VECSEL on optiseen injektioon perustuva laser, eli elektroni-aukkopari (EHP eli electron hole pair) saadaan aikaiseksi valon avulla. Optinen injektio mahdollistaa sähköistä pumppaamista yhtenäisemmän viritystilan saavuttamisen isoille VECSEL-vahvistinpeilin pinta-aloille [1] ja korkeamman ulostulotehon sähköiseen pumppaukseen verrattuna [2]. Sähköä tarvitaan siis vain välillisesti VECSEL-vahvistinpeilin viilentämiseen ja pumppulaserin ajamiseen.

VECSELin toiminta perustuu vahvistinmateriaaliin luotuun populaatioinversioon ja populaatioinversion avulla syntyvään valon stimuloituun emissioon. VECSELissä väliaine, jossa virittyminen ja stimuloitu emissio tapahtuu, koostuu tavanomaisesti kvanttikaivoista. Syntynyt valo oskilloi ja vahvistuu laseronkalossa, jonka määrittävät vahvistinpeiliin integroitu Bragg-peili ja yksi tai useampi ulkoinen peili. Ulkoinen onkalo on hyödyllinen monesta syystä: se mahdollistaa esimerkiksi lasersäteen tarkan kohdistamisen [3] ja erillisten optisten komponenttien (kuten taajuuskahdenuskiteen) asettamisen onkalon sisään, mikä on lähes mahdotonta monoliittisissa rakenteissa. Onkaloon muodostuu seisova aalto ja siten onkalon optinen pituus on emissioaallonpituuden monikerta [4].

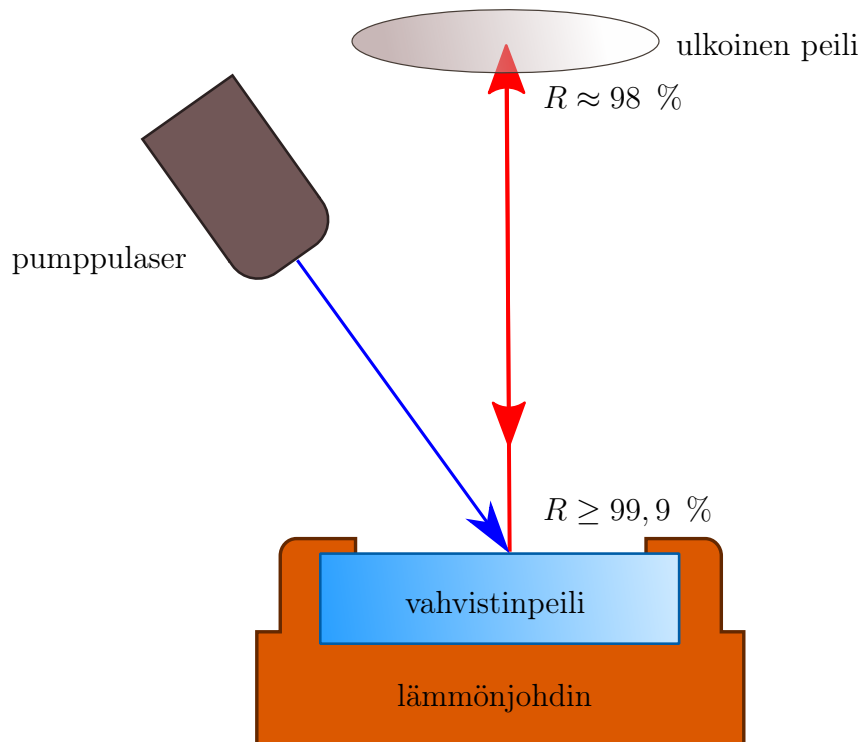
Kvanttikaivojen rakennetta muuttamalla voidaan valmistaa eri aallonpituudella laseroivia VECSELeitä. Merkittävimpiä rajoittavia tekijöitä VECSELien suunnittelussa ovat valmistusmateriaalien rajoitukset (kasvatusteknilliset syyt) ja kaupallisesti hankittavien pumppulaserien saatavuus ja monipuolisuus. Taajuuskahdentamalla on mahdollista laajentaa VECSELien toiminta-aluetta lyhyemmille aallonpituuksille, minne on muutoin vaikea päästä ilman tätä epälineaarista prosessia. [1]

2.2 Kokoonpano

VECSEL on laser, joka koostuu VECSEL-vahvistinpeilistä, pumppulaserista, sekä ulkoisesta onkalosta. Vahvistinpeilin heijastuvuus on yli 99,9 %. [1] Optinen injektio toteutetaan ulkoisella pumppulaserilla. Pumppulaser on yleensä sähköisesti pumpattu. Pumppulaserin aallonpituus ja teho tulee valita VECSELin sovelluskohteen ja vahvistinpeilin toteutuksen mukaan.

Osa VECSELiin optisesti injektoidusta energiasta muodostaa rakenteeseen lämpöä. Lämpö heikentää vahvistinpeilin toimintaa ja tulee siksi siirtää tehokkaasti pois peilistä. Vahvistinpeiliä ympäröivän rakenteen tulee siirtää lämpöä tehokkaasti. Lämmönsiirto saadaan aikaan aikaan vahvistinpeilin päälle asetetulla laseremissiolle läpinäkyvällä ja hyvin lämpöä johtavalla materiaalilla, esimerkiksi laadukkaalla timantilla jossa ei ole epäpuhtauksia. Valittu lämmönjohdin voidaan yhdistää kuparialustaan, jonka kautta lämpö johdetaan kylmäsäiliöön (vesikierto).

Laservalo poistetaan onkalosta ulkoisen peilin kautta. Ulkoisen peilin heijastuvuudella voidaan säätää onkalosta poistuvan valon määrää ja näin ollen laserin ulostulotehoa. VECSELeissä ulkoisen peilin heijastuvuus on noin 98 % [1]. Kuva kokoonpanosta löytyy alta (kuva 2.1).



Kuva 2.1 Esimerkki VECSEL- laserin rakenteesta ja I-mallisesta laseronkalosta.

Yksinkertaisin onkalo muodostuu vahvistinpeilistä ja ulkoisesta peilistä. Tällaista onkaloa kutsutaan I-onkaloksi, sillä valo kulkee onkalossa lineaarisesti päätypeililtä toiselle. Lisäksi on olemassa monimutkaisempia kaviteetin geometrioita, kuten V-kaviteetti, jossa on vahvistinpeilin lisäksi kaksi ulkoista peiliä V:n muotoisesti asetettuina.

3. VECSEL-VAHVISTINPEILI

VECSEL-vahvistinpeilien tarkoituksena on tuottaa valoa tietyllä aallonpituudella. Tähän liittyvät prosessit on kuvailtu tässä luvussa. Kvanttikaivot ja niihin liittyvä teoria on käsitelty vasta luvussa 5.

3.1 Alustakiteet

VECSEL-vahvistinpeilit valmistetaan yleensä epitaksiaalisesti alustakiteen päälle alustakiteen kiderakenne säilyttäen. Tyypillisiä alustakidemateriaaleja ovat esimerkiksi pii (Si) ja galliumarsenidi (GaAs). Epitaksiaalista kasvatusta varten alustakiteet muokataan ohuiksi kiekonmuotoisiksi kappaleiksi. III-V yhdistepuolijohdeissa ryhmän III ja ryhmän V alkuaineita on yhdistetty keskenään sinkkivälkerakenteeksi. Sinkkivälke voidaan ajatella koostuvan kahdesta fcc-hilasta, joista toisessa on ryhmän V alkuaineita, ja toisessa ryhmän III alkuaineita. Näiden fcc-alihilojen atomien hilapaikat eroavat toisistaan vektorin $[\frac{1}{4}a, \frac{1}{4}a, \frac{1}{4}a]$ verran [5].

Alustakiteen toinen tarkoitus on toimia mekaanisena tukena kasvatetuille kalvoille prosessoinnin aikana. Alustakide voidaan poistaa lopullisista rakenteista esimerkiksi syövyttämällä. Näin VECSEL-sirut voidaan liittää paremmin lämpöä johtaviin materiaaleihin, mikä tehostaa VECSEL-vahvistinpeilin jäähdytystä.

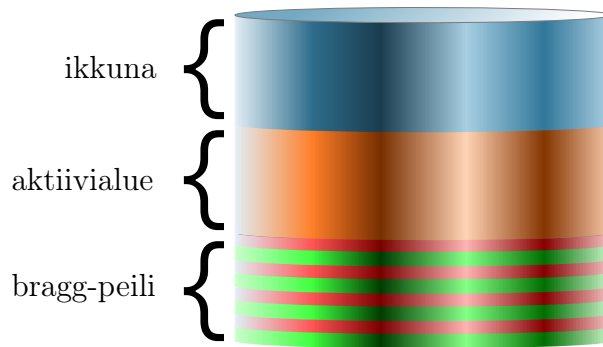
3.2 Rakenne

VECSEL-vahvistinpeili on puolijohderakenne, jonka perimmäinen tarkoitus on toimia stimuloitun emission lähteenä sekä erittäin hyvin heijastavana peilinä, eli synnyttää ja vahvistaa laservaloa. Jatkuva stimuloitu emissio vaatii populaatioinversion. Populaatioinversiossa tarkasteltavien atomien viritystilojen miehitys on saman atomin perustilan vastaavaa suurempi [5]. Tämä saadaan aikaiseksi virittämällä varauksenkuljettajia pumppulaserilla riittävän korkeaan energiatilaan, josta ne kulkeutuvat kvanttikaivon perustiloille. Virityksessä varastoitu energia muunnetaan osittain valoksi ja osittain lämmöksi. Syntyneen valon aallonpituus on pumppulaserin

vastaavaa pidempi. Valon aallonpituus kasvaa energian säilymislain perusteella, koska fotonien luoma EHP emittoi rekombinoituessaan fotonin, jonka energia on korkeintaan saapuneen fotonin energia. Valon muuntaminen tapahtuu vahvistinpeilin osassa, jota kutsutaan aktiivialueeksi.

Laservalo oskilloi laseronkalon (kaviteetti) sisällä peilien välissä. Kaviteetti muodostuu peileistä, joista toinen on integroitu vahvistinpeiliin. Tämä peili on nimeltään Bragg-peili eli DBR (Distributed Bragg Reflector). Bragg-peilissä esiintyy kahta puolijohdemateriaalikerrosta toistuvasti peräkkäin, jotta saataisiin mahdollisimman monta osittain heijastavaa rajapintaa.

Vahvistinpeilin uloimman materiaalikerroksen, ikkunan, tarkoituksena on rajoittaa varauksenkuljettajien karkaamista aktiivialueelta näytteen pinnalle. Varauksenkuljettajat pääsevät pintatilojen kautta rekombinoitumaan ei-radiatiivisesti, eli nämä varauksenkuljettajat eivät siten osallistu laseremission tuottamiseen. Syntyy siis häviöitä. Vahvistinpeilin rakenne on esitetty kokonaisuutena kuvassa 3.1.



Kuva 3.1 VECSEL-vahvistinpeilin osat. Kuvasta puuttuu alustakide ja lämmönjohdin.

Vahvistinpeiliä suunniteltaessa on erityisen tärkeää ottaa huomioon myös rakenteen lämpeneminen laseroinnin aikana. Lämpötila vaikuttaa merkittävästi (puolijohde)materiaalin taitekertoimeen ja fyysiseen kokoon (lämpölaajeneminen). Tästä seuraa, että materiaalikerroksien optinen paksuus OPL (Optical Path Length) voi muuttua lämpötilan muutoksen seurauksena. Lämpötila vaikuttaa myös vahvistuspektriin, laserointikynnykseen ja puolijohdemateriaalin energia-aukon suuruuteen.

3.2.1 Bragg-peili

Bragg-peilin toiminnan ymmärtämiseksi laservalon kulkua peilissä voidaan tarkastella sähkömagneetiikan näkökulmasta. Kahden aineen rajapinnasta heijastuvan valon ja siihen saapuvan valon sähkökenttien välinen suhde määräytyy valon polari-

saatiosta. Saapumistasoon nähden kohtisuorasti polarisoituneen valon tapauksessa suhde on

$$\left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}}\right)_{\perp} = \frac{\frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_i - \frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_t}{\frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_i + \frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_t} = \sqrt{R_{\perp}} \quad (3.1)$$

ja saapumistasoon suuntaisesti polarisoituneen valon tapauksessa se on

$$\left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}}\right)_{\parallel} = \frac{\frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_i - \frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_t}{\frac{n_i}{\mu_i} \cos \theta_i + \frac{n_t}{\mu_t} \cos \theta_t} = \sqrt{R_{\parallel}}, \quad (3.2)$$

missä n_i ja μ_i ovat sen väliaineen, josta valo tulee, taitekerroin ja permeabiliteetti, ja n_t ja μ_t vastaavat suureet väliaineessa, josta valo heijastuu. θ_i on valon saapumiskulma ja θ_t valon taittumiskulma rajapinnan normaaliin nähden. [6]

Oletetaan, että Bragg-peilin puolijohdemateriaalit eivät ole magneettisia, jolloin $\mu_i = \mu_t = \mu_0$. Yksinkertaisen VECSELin tapauksessa, joka perustuu I-kaviteettiin, voidaan myös olettaa, että $\theta_i \approx 0$ ja $\theta_t \approx 0$. Tällöin sähkökenttien suhteet saavat muodot

$$\left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}}\right)_{\perp} = \frac{n_i - n_t}{n_i + n_t} \quad (3.3)$$

ja

$$\left(\frac{E_{0r}}{E_{0i}}\right)_{\parallel} = \frac{n_t - n_i}{n_i + n_t}. \quad (3.4)$$

Yhtälöistä 3.3 ja 3.4 huomataan, että sähkökenttien suhde voi saada sekä positiivisia että negatiivisia arvoja aineiden taitekertoimista riippuen. Jos sovitaan, että saapuvan sähkökentän suuruus on aina positiivinen, heijastuvan valon kentän arvon etumerkki voi muuttua. Negatiivinen sähkökenttä ilmaisee valon vaihesiirtoa, eli valon vaihe on siirtynyt π :n verran.

Voidaan myös todeta, että valosta heijastuu rajapinnassa aina tietty osa yhtälöiden 3.3 ja 3.4 mukaisesti. Yksinkertainen Bragg-peili perustuu siihen, että kahta erilaisista puolijohdekerrostyyppeä esiintyy monta peräkkäin. Kerroksien paksuudet valitaan siten, että peilistä ulostulevien valonsäteiden interferenssi on konstruktivinen, eli ne ovat samassa vaiheessa φ . Tämä tapahtuu, kun molempien kerrosten OPL vastaa

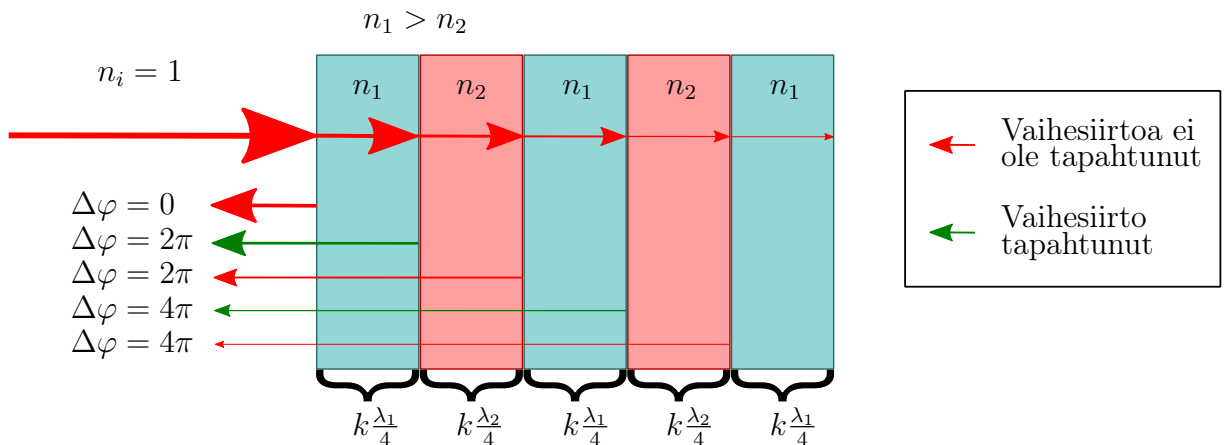
tyhjiön valon aallonpituuden λ_0 neljäsosan paritonta moninkertaa. Kerroksen fyysinen paksuus d on siis

$$d = N \frac{OPL}{n} = \frac{N\lambda_0}{4n}, \quad (3.5)$$

joka vastaa väliaineen valon aallonpituuden neljäsosan moninkertaa.

Oletetaan Bragg-peilin ensimmäisen ja viimeisen kerroksen koostuvan materiaalista, jolla on korkeampi taitekerroin. Merkitään korkeamman n :n materiaalia 1:llä ja toista 2:lla. Tarkastellaan valon \parallel -polarisaatiota. Heijastuksen periaate on seuraava: kun monokromaattinen valonsäde saapuu Bragg-peiliin, ensimmäinen osa heijastuu heti rajapinnasta. Tämän säteen vaihe-ero $\Delta\varphi$ on 0. Loput valosta jatkaa ensimmäisen kerroksen läpi, minkä jälkeen osa valosta heijastuu seuraavassa rajapinnassa, jossa tapahtuu vaihesiirto. $\Delta\varphi$ on siis $\pi/2 + \pi + \pi/2 = 2\pi$. Loput säteestä jatkaa materiaalissa 2. Valon $\Delta\varphi$ on aluksi $\pi/2$, mutta se kulkee kerroksen läpi, heijastuu ilman vaihesiirtoa ja etenee kahden kerroksen lävitse. Lopullinen $\Delta\varphi$ on $\pi/2 + \pi/2 + \pi/2 + \pi/2 = 2\pi$. Kaikki kolme tarkasteltua säteen osaa ovat nyt samassa vaiheessa.

Tätä periaatetta voidaan toistaa myös myöhemmille heijastuksille, myös \perp -polarisaation tapauksessa. Huomattavaa on, että moninkertaiset heijastukset jätettiin tarkastelussa huomiotta. Kuva 3.2 on visuaalinen lähestymistapa Bragg-peilin toimintaan.



Kuva 3.2 Bragg-peilin toimintaperiaate. Kuvassa ei esiinny moninkertaisia heijastuksia. Valo on oletettu \parallel -polarisoituneeksi.

Bragg-peili on siis puolijohderakenne, joka heijastaa vahvasti tietyn aallonpituista valoa. Voidaan osoittaa, että $2N + 1$ -kerroksisen Bragg-peilin heijastuvuus aallonpituuden funktiona on muotoa [7]

$$R(\lambda_0) = \left(\frac{1 - (n_1/n_2)^{2N} (n_1^2/n_s)}{1 + (n_1/n_2)^{2N} (n_1^2/n_s)} \right)^2, \quad (3.6)$$

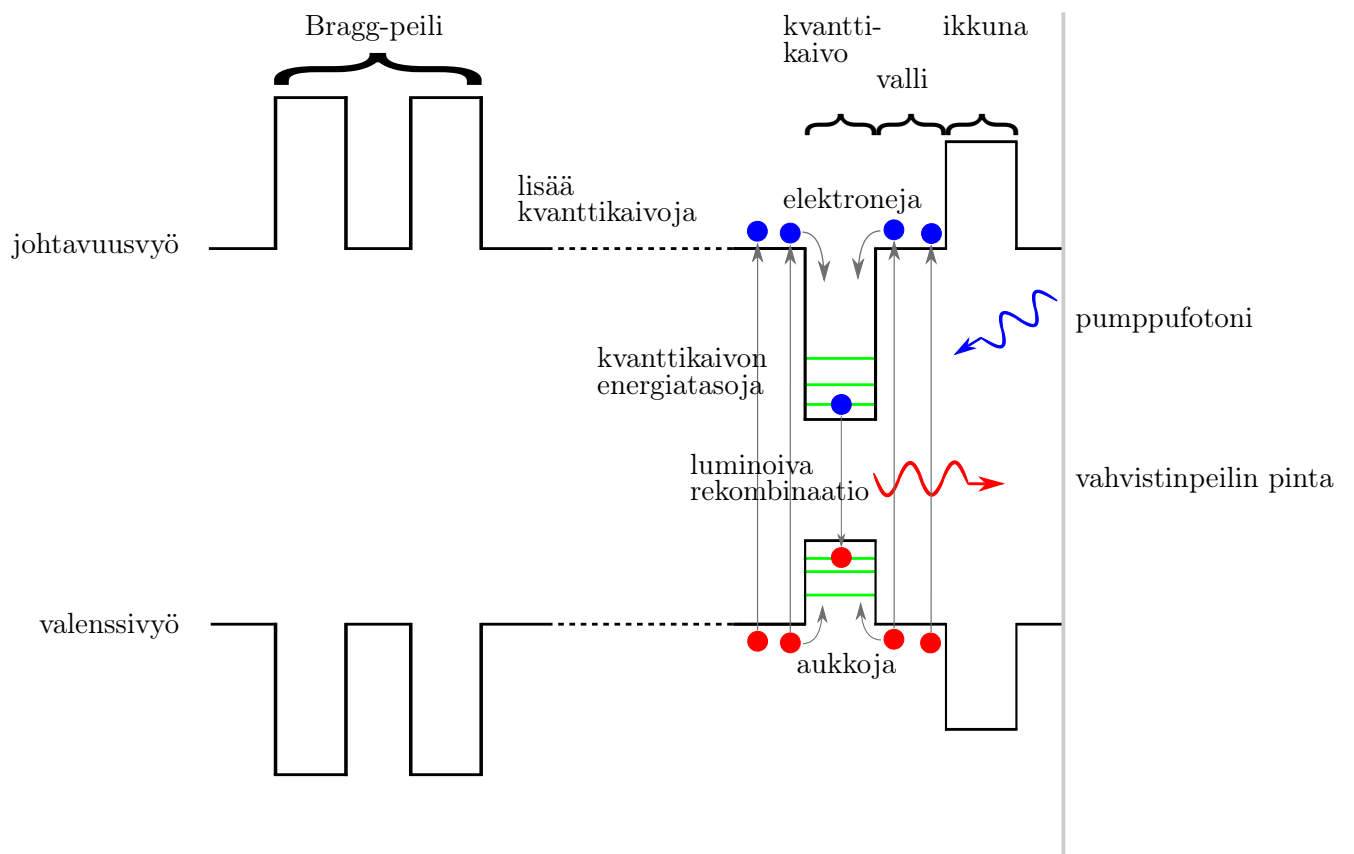
jossa n_s on alustakiteen taitekerroin. Alustakide oletetaan absorboivan kaiken sen sisälle siirtyneen valon. Esimerkiksi GaAs:n absorptiokerroin on kokoluokkaa $5 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ aallonpituudelle 590 nm[8], mistä seuraa, että esimerkiksi noin 1mm paksuinen GaAs-alustakide absorboi käytännössä kaiken siihen siirtyneen valon.

3.2.2 Aktiivialue ja ikkuna

VECSEL-vahvistinpeilin aktiivialueen optinen injektio voi perustua kahteen menetelmään. Ensimmäinen näistä on kaivonsisäinen injektio, jossa EHP-parin elektronin virittyminen tapahtuu suoraan kvanttikaivoon (QW eli quantum well). Toinen tapa suorittaa virittäminen perustuu valleihin, jotka ovat QW:n ympärille sijoitettuja puolijohdekerroksia, joiden energia-aukko on QW:n energia-aukkoa suurempi. Menetelmässä elektroni ja aukko virittyvät ensin vallimateriaaliin, josta ne laskeutuvat energeettisesti alemmille QW energiatiloille. [1] Tätä menetelmää kutsutaan vallipumppaamiseksi.

Aktiivialue koostuu siis kvanttikaivoista ja vallikerroksista. Kvanttikaivon pohjan ja vallin johtavuusvyön energioiden välisen erotuksen tulee olla riittävän suuri, jotta kaivoon muodostuisi rajattuja kvanttitiloja ja elektroni ei virittyisi takaisin vallin johtavuusvyölle, eikä aukko vastaavasti vallin valenssivyölle, kuten kuvasta 3.3 voi havaita. Varauksenkuljettajien, eli elektronin ja aukon, tulisi virittyä lähelle vallin johtavuus- ja valenssivyön reunoja, jotta energiaa ei menisi hukkaan [1].

Aktiivialue päällystetään ikkunakerroksella. Ikkunan tärkein ominaisuus on materiaalin korkea energiarako, joka on huomattavasti vallikerroksen vastaavaa suurempi. Näin muodostuu potentiaalivalli sekä johtavuus- että valenssivyölle. Näin voidaan estää elektronien ja aukkojen karkaaminen vahvistipeilin pintakerrokseen, joissa varauksenkuljettajat rekombinoituisivat, mikä ei ole toivottua. Vallin ja ikkunan johtavuusvyöiden välinen energiaero on niin suuri, että varauksenkuljettaja ei kykene virittymään termisesti johtavuusvyön huipulle. Toisaalta ikkunan energiavyön paksuus on riittävän suuri, jotta tunneloituminen sen lävitse on epätodennäköistä. Ikkunan olisi hyvä absorboida pumppu- ja laservaloa mahdollisimman vähän. Ikkunan lämmönjohtavuuden pitää olla riittävä lämmön siirtämiseksi vahvistinpeilin ulkopuolelle. Joissakin VECSEL-kokoonpanoissa ikkunan päälle asetetaan lämmönjohdin, joka on yleensä timantti. Ikkuna voidaan vielä päällystää erikseen hapettumista tai heijastusta minimoivalla kerroksella. [1]



Kuva 3.3 VECSEL-vahvistinpeilin valenssi- ja johtavuusvyöt. Kuva havainnollistaa myös EHP:n käyttäytymistä aktiivialueessa. Kerroksien paksuutta ei ole piirretty mittakaavassa.

4. VAHVISTINPEILIN KASVATUS

Tässä luvussa käydään läpi puolijohdemateriaalien ja -rakenteiden valmistamiseen liittyviä periaatteita. Kappale sisältää myös tietoa, joka on tarpeellista luvun 6 lukemista ja ymmärtämistä varten.

4.1 Molekyyлисuihku epitaksia

VECSELin kaltaisia puolijohderakenteita suunniteltaessa on selvää, että valmistusprosessin tulee olla riittävän tarkka ja hallittu. Tällainen rakenteiden kasvatus on mahdollista esimerkiksi molekyyлисuihku epitaksian (molecular beam epitaxy, MBE) avulla.

MBE on tyhjiöhöyrystystekniikka, jossa puolijohdekalvot valmistetaan alkuaineistaan höyrystämällä kutakin alkuainetta atomi- tai molekyyli vuona alustakiteelle erittäin matalapaineisessa ($P < 10^{-8}$ mbar) ultratyhjiössä (ultra high vacuum, UHV). Valmistetuissa epitaksiaalikerroksissa epäpuhtauksien osuus on alle kymmenen miljardisosaa. [9] Atomivuot tuotetaan materiaalilähteissä, jotka voivat perustua kiinteisiin aineisiin, jolloin tekniikkaa kutsutaan kiinteän lähteen MBE:ksi (SSMBE, Solid State Molecular Beam Epitaxy). Jos materiaali on kaasufaasissa, tekniikkaa kutsutaan kaasulähde-MBE:ksi (GSMBE, Gas State Molecular Beam Epitaxy). Lisäksi käytössä on myös tekniikka, jossa materiaalilähteet ovat metallo-organisia yhdisteitä. Tällöin puhutaan metallo-organisesta MBE:stä (MOMBE, Metal-organic Molecular Beam Epitaxy). MOMBE:n etuna on lähes huoneenlämmössä toimivat materiaalilähteet [10], mikä ei ole mahdollista muissa MBE-tekniikoissa.

MBE:ssä pyritään luomaan mahdollisimman puhtaita puolijohdekalvoja. Tähän puhtautteen päästään estämällä epäpuhtauksien kulkeutuminen kiteeseen kasvuprosessin aikana ja käyttämällä sopivia kasvuolosuhteita kullekin materiaalille. Yksi kidevirheiden aiheuttaja on varaukselliset partikkelit, joiden päätymistä alustakiteelle pyritään välttämään. Varaukselliset partikkelit voivat tunkeutua jossain määrin materiaalin sisälle, jos niillä on riittävästi energiaa. Tätä halutaan välttää, minkä takia MBE-tekniikka perustuu sähköisesti neutraaleihin voihin. Hiukkasten läpäisykyky voi usein luoda materiaaliin kidevirheitä, joita käsitellään aliluvussa 6.1. Ionien

läpäisykyky ei ole MBE-tekniikassa kovin suuri verrattuna muihin kasvatusmenetelmiin, kuten ioni-istuttamiseen. Ionien energiat ovat pieniä, noin kymmenen eV:n luokkaa. [11] Tämä vähentää ionien merkitystä kidevirheiden syntymisessä. Tämä ei tosin tarkoita sitä, etteikö MBE-tekniikalla valmistetut kalvot sisältäisi kidevirheitä.

4.2 Kasvatusprosessit

MBE-tekniikassa puolijohdekalvot kasvatetaan tyhjiöreaktorin sisällä. Reaktorin isoin osa on ruostumattomasta teräksestä valmistettu kammio, jonka sisällä kasvatus tapahtuu. Kammioon pumpataan tyhjiö pumpulla, joka on yhteydessä kasvatuskammioon. Kammioon on kiinnitetty irroitettavat materiaalilähteet ja sulkimet, jotka tietokoneen ohjaamana muodostavat atomivuon ja kontrolloivat sitä. Materiaalilähteiden ympärillä on vedellä toimiva jäähdytysjärjestelmä. [12] Kasvatuskammiossa on moottorilla toimiva näytteenpidin, jota kutsutaan manipulaattoriksi. Alustakiteitä voidaan asettaa manipulaattoriin. Substraatit laitetaan sisään ja otetaan pois latausluukusta (fast entry lock, FEL). Latausluukun ja kasvatuskammion välissä on valmistelukammio, jota käytetään alustakiteen esivalmisteluun ennen kasvatusta.

Kasvatusprosessi aloitetaan siirtämällä substraatti latausluukkuun. Tämän vaiheen käyttöönotto on vähentänyt epäpuhtauksien määrää merkittävästi. [9] FEL:stä alustakide siirretään valmistelukammioon kaasupoistoon; substraatin pinnalle muodostuu nimittäin ajan mittaan oksideja. Valmistelukammioista näyte siirretään kasvatuskammiossa olevaan manipulaattoriin, joka pyörittää näytettä kasvatuksen aikana tasalaatuisuuden takaamiseksi.

Varsinaisessa kasvatuksessa materiaalilähteiden lämpötiloja nostetaan ja sulkijoita avataan vuon aikaansaamiseksi. Yleensä III-V-puolijohdekasvatuksissa on auki vähintään yksi kolmannen ja yksi viidennen alkuaineryhmän uuni ja sekä mahdollisesti seostusmateriaalin (esim. pii tai beryllium) lähde. Uunien avaamisen ajoittamisesta on vastuussa automaatio, joka noudattaa käyttäjän kirjoittaman reseptin mukaisia ohjeita.

Kun näyte on valmis, annetaan kasvatuskammion paineen laskea, minkä jälkeen näyte voidaan ottaa ulos karakterisointia (mittaukset, kuvantaminen yms.) varten. Kun paine on laskenut ja näyte on otettu ulos kasvatuskammioista, voidaan kasvattaa uusi näyte. Yleensä tätä ennen edeltää ulosotetun näytteen karakterisointi, eli sen ominaisuuksien mittaaminen.

5. KVANTTIKAIVON SIMULOINTI

Vahvistinmateriaalissa syntyvää valoa voidaan mallintaa teoreettisesti. Tässä luvussa käsitellään mallinnuksen kannalta merkityksellisimpiä teoreettisia malleja ja parametreja. Keskiössä on kuitenkin kvanttikaivo ja siihen liittyvät teorat.

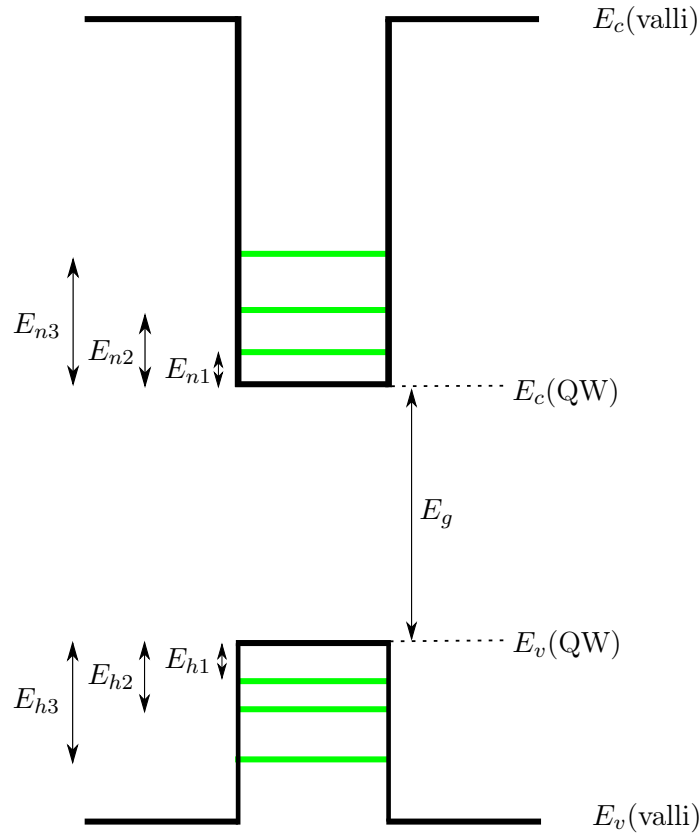
VECSELin laserointiaallonpituutta voidaan arvioida laskemalla EHP:n rekombinaatiosta vapautuvan fotonin energia. Vapautunut energia on kvanttikaivon energia-aukon sekä johtavuusvyön pohjan ja kvanttikaivon perustilan että valenssivyön huipun ja kvanttikaivon perustilan välisten energiaerojen (ks. kuva 3.3) summa:

$$E_{tot} = E_g + E_{n1} + E_{h1}, \quad (5.1)$$

missä muuttujat ovat mainitussa järjestyksessä. Yhtälössä jätetään huomioimatta eksitonin, toisin sanoen EHP:n, sidosenergia. Yhtälön 5.1 energia E_{tot} vastaa yksittäisen fotonin energiaa.

Puolijohdefysiikassa on käytössä useita erilaisia energiaan liittyviä termejä. Kvanttikaivojen suhteen oleellisinmat energiaan liittyvät muuttujat on tuotu konkreettisesti esille kuvassa 5.1. Puolijohdemateriaaleissa ja eristeissä on energia-aukko, joka koostuu energiatiloista, jotka eivät ole sallittuja elektroneille [5]. Energia-aukkoa alhaalta rajaava energia on valenssivyön huippu ja ylhäältä rajaava johtavuusvyön pohja. Valenssivyön huipun energiatasoa merkitään E_v :llä ja johtavuusvyön pohjan energiatasoa E_c :llä.

Kuvassa 5.1 johtavuusvyön kvanttikaivon perustilaa korkeampia energiatiloja on merkitty muuttujilla E_{n2} , E_{n3} ... E_{nk} , missä k on energiatilan järjestysnumero. Vastaavasti E_{h2} , E_{h3} jne. on määritelty samalla tavalla aukolle.



Kuva 5.1 Periaatekuva kvanttikaivon energiavöistä ja energiatiloista.

Puolijohdemateriaalin energiarako riippuu useasta tekijästä, kuten materiaalin lämpötilasta ja myötymästä. Energiaraon riippuvuus lämpötilasta noudattaa yhtälöä

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}, \quad (5.2)$$

missä $E_g(0)$, α ja β ovat materiaalikohtaisia sovitusparametrejä [13]. Yleisesti energiarako siis pienenee lämpötilan noustessa. VECSEL-komponentin lämpötilaan vaikuttavat pääasiassa rakenteessa pumppauksen seurauksena syntyvä lämpö ja alustan jäähdytyskyky. Lämmöntuotto kasvaa pumppulaserin viritystehon kasvaessa.

Myötymä riippuu materiaaliin kohdistuvasta jännityksestä, eli siitä mihin pinnan-suuntaiseen hilavakion arvoon rakenteen tulee sopeutua epitaksiaalisessa kasvatuk-

sessä. Jos puolijohdemateriaaliin kohdistuu vetojännitys, materiaalin energiarako pienenee. Vastaavasti puristusjännitys saa energiaraon kasvamaan. Yleisessä tapauksessa jännityksen ja energiaraon väliseen yhteyteen vaikuttaa myös se, mihin suuntaan jännitys kohdistuu. [14] Epitaksiaalisesti kasvatettujen materiaalien tapauksessa jännitys on tavallisesti pinnansuuntainen.

Sekä lämpötilan että myötymän tapauksessa energiaraon muutosta voi tarkastella seuraavalla ajatusmallilla: jos aineen atomit ovat kauempana toisistaan, mikä voi syntyä vetomyötymästä tai korkeasta lämpötilasta, atomien elektronien välinen vuorovaikutus pienenee, jolloin niiden on helpompi siirtyä johtavuusvyölle. Vastaavaa ajatusmallia voidaan käyttää myös kasvavan energiaraon yhteydessä.

Varauksenkuljettajat käyttäytyvät kvanttikaivossa perinteisen hiukkanen laatikossa -esimerkin mukaisesti. Tämän seurauksena varauksenkuljettajan energia on kvantittunut. [5] Puolijohdemateriaalissa $m:n$ tilalla käytetään varauksenkuljettajan efektiivistä massaa [5]

$$m^* = \frac{\hbar^2}{d^2 E / d\mathbf{k}^2}, \quad (5.3)$$

missä $d^2 E / d\mathbf{k}^2$ on energiavyön toinen derivaatta elektronin aaltovektorin suhteen. Yhtälön 5.1 energiat E_{n1} ja E_{h1} ovat matalimmat kvanttitilat kvanttikaivossa, eli perustilat. Jos kvanttikaivo oletetaan yksiulotteiseksi ja äärettömän syväksi, pohjatilän energian arvo on [5]

$$E_0 = \frac{(\pi\hbar)^2}{2m^*L^2}, \quad (5.4)$$

missä \hbar on Diracin vakio, m^* hiukkasen efektiivinen massa ja L laatikon leveys. Johtavuusvyön kvanttikaivossa käytetään elektronin efektiivistä massaa ja valenssivyön kvanttikaivon tapauksessa aukon efektiivistä massaa. Aukot ja niiden efektiiviset massat voidaan jakaa kevytaukkoihin ja raskasaukkoihin. [5]

Vahvistinpeilin kvanttikaivo ei kuitenkaan vastaa todellisuudessa äärettömän syvää laatikkoa, vaan syvyyden määrittää energiavöiden epäjatkuvuudesta syntyvä energiaero. Kvanttikaivon perustilan energian ratkaisemiseksi tarvitaan kvanttimekaniikkaa. Yksiulotteinen, aikariippumaton Schrödingerin yhtälö on [5]

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \Psi(x) + V(x)\Psi(x) = E\Psi(x), \quad (5.5)$$

missä $\Psi(x)$ on hiukkasen aaltofunktio ja $V(x)$ hiukkasen potentiaalienergia. Elektronille (tai aukolle) kvanttikaivossa $V(x) = 0$, joten yhtälö saadaan muotoon

$$\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} + \frac{2mE}{\hbar^2}\Psi(x) = 0 \quad (5.6)$$

Määritellään nyt $\zeta \equiv \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$. Yhtälöstä nähdään, että aaltofunktioksi käy $\Psi(x) = A\cos(\zeta x)$ tai $\Psi(x) = A\sin(\zeta x)$, joissa A on tuntematon [15].

Elektronille (tai aukolle) vallissa $V(x) = U_0$, missä U_0 on kvanttikaivon syvyys, jolloin yhtälö saadaan muotoon

$$\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} - \frac{2m(U_0 - E)}{\hbar^2}\Psi(x) = 0 \quad (5.7)$$

Määritellään nyt $\kappa \equiv \sqrt{\frac{2m(U_0 - E)}{\hbar^2}}$. Havaitaan, että $\Psi(x) = \chi e^{-\kappa x}$ toteuttaa yhtälön (χ on tuntematon) [15]. Aaltofunktio on siis eksponentiaalisesti vaimeneva paikan suhteen. Tästä seuraa, että on epätodennäköisempää löytää varauksenkuljettaja kvanttikaivon ulkopuolelta.

Aaltofunktion ja sen derivaatan tulee olla jatkuvia myös kvanttikaivon ja vallin rajalla. Valitaan x :n nollakohdaksi kvanttikaivon keskus. Aaltofunktion jatkuvuudesta saadaan

$$\Psi(x) = A\cos(\zeta x) = \chi e^{-\kappa x}, \quad (5.8)$$

ja aaltofunktion derivaatan jatkuvuudesta saadaan

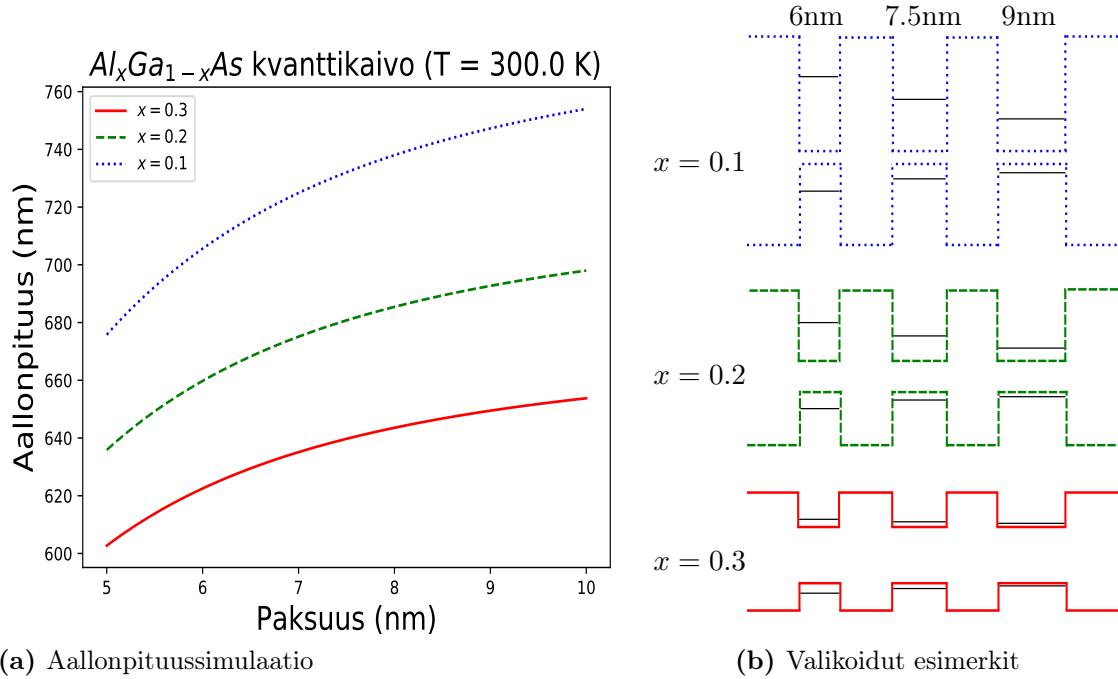
$$\frac{d\Psi(x)}{dx} = -\zeta A\sin(\zeta x) = -\kappa \chi e^{-\kappa x}, \quad (5.9)$$

Jakamalla yhtälöt keskenään saamme yksiulotteisen, äärellisen kvanttikaivon perustilan energian yhtälön

$$\kappa = \zeta \tan\left(\zeta \frac{L}{2}\right). \quad (5.10)$$

Yhtälö 5.10 on mahdollista ratkaista esimerkiksi numeerisesti Pythonin avulla hyö-

dyntäen approksimaationa yhtälöä 5.4. Liite A:ssa on esitelty alkeellinen VECSELin laserointiaallonpituutta simuloiva ohjelma, jonka yksi tuloste (AlGaAs-pohjainen kvanttikaivo ja valli erilaisilla kvanttikaivomateriaalin alumiinikompositioilla ja erilaisilla kaivon paksuuksilla) on esitelty kuvassa 5.2a. Ohjelma perustuu Scott Maddoxin luomaan Python-kirjastoon *openbandparams* [16], jolla voi simuloida puolijohderakenteita ja säätää niiden parametreja.



Kuva 5.2 *AlGaAs-kvanttikaivon simulointitulokset. Vallimateriaalina on käytetty $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$:ia. Energia-aukko on todellisuudessa huomattavasti isompi kuin kuvassa.*

Kuvasta 5.2a havaitaan, että vahvistinpeilin ominaisuuksia on mahdollista muokata esimerkiksi säätämällä kvanttikaivon paksuutta tai kompositiota. Myös vallin materiaalin muokkaaminen vaikuttaa laserin aallonpituuteen.

6. VAHVISTINPEILIN LAADUN ARVIOINTI

Viimeisen luvun aiheena ovat kidevirheet ja niiden tunnistaminen. Käymme läpi tavallisimmat kidevirhetyypit. Lisäksi käymme läpi mittausjärjestelyn, jolla kidevirheitä tutkitaan.

6.1 Kidevirheet

Vahvistinpeilistä halutaan mahdollisimman laadukas. Laadukkaan vahvistinpeilin piirteitä ovat esimerkiksi tasainen pinta ja kidevirheiden pieni lukumäärä. Vahvistinpeilin laatua voi arvioida useilla menetelmillä. Heijastusmittauksella voidaan tutkia MBE-kasvatetun Bragg-peilin laatua, kun taas fotoluminesenssimittauksella (PL-mittaus) voidaan selvittää kuinka hyvin kvanttikaivon kasvatus onnistui.

Fotoluminesenssimittauksella saadaan selville kvanttikaivon emissioaallonpituus (eli emittoiko laser halutulla aallonpituudella). Lisäksi PL-signaalin suuruudesta ja piikin leveydestä voidaan päätellä, kuinka tehokkaasti EHP rekombinoituu radiatiivisesti. Piikin leveys kertoo muun muassa siitä, onko materiaalissa ylimääräisiä epäpuhtaustiloja.

Puolijohderakenne kasvaa energeettisesti edullisimmalla tavalla. Alustakiteelle voi esimerkiksi päätyä epäpuhtauksia, tai sen kasvunaikainen lämpötilagradientti ei ole ollut suunnitellun mukainen, mistä seuraa se, että puolijohteen kiderakenne ei pysy haluttuna. Aineilla voi olla myös useita kiinteän aineen esiintymismuotoja. Esimerkiksi GaAs voi kasvaa wurtsiittirakenteeseen sinkkivälkerakenteen sijaan.

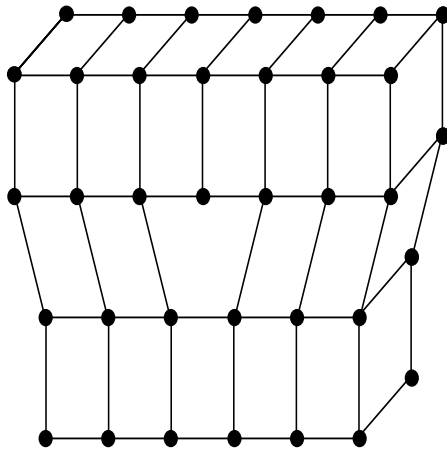
Riippuen kasvatusolosuhteista, kiteelle on toisinaan energeettisesti edullisinta muodostaa kidevirheitä eli epäjatkuvuuksia kiteeseen. Pistemäiset kidevirheet ja viivavirheet eli dislokaatiot ovat kaksi yleistä kidevirheiden luokkaa. Kidevirheiden olemassaolo lisää kiteen entropiaa. Todellisilla kiderakenteilla on olemassa aina rajapinta (toisin sanoen kide ei ole ääretön), mikä puolestaan laskee täydellisyyden saavuttamista kiteessä. [17] Kidevirheet ovat siis luonnollinen ilmiö.

Pistemäiset kidevirheet luokitellaan yleensä kahteen pääryhmään: epäpuhtausvir-

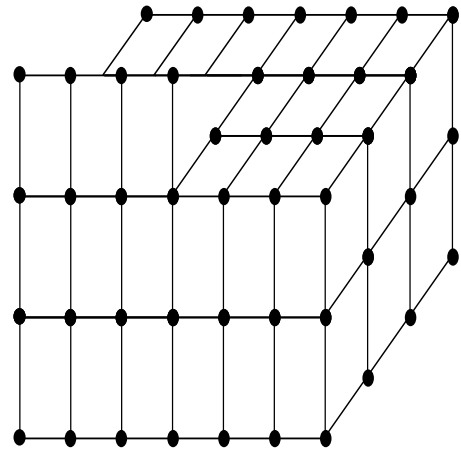
heisiin ja natiiveihin kidevirheisiin. Epäpuhtausvirheitä muodostuu, kun yksittäinen kideatomi korvaantuu jollakin toisella atomilla, jonka järjestysluku on eri kiteen atomeihin verrattuna. Natiivit kidevirheet eivät tarvitse epäpuhtausatomeja. Natiiveja kidevirheitä ovat esimerkiksi avoimen paikan virhe (atomia ei esiinny tietyssä kohdassa lainkaan) ja puristetun atomin virhe (riittävän pieni atomi/ioni tunkeutuu mahdollisimman sopivalle paikalle kidettä, siirtäen myös muita kiteen osasia hieman). [17]

Dislokaatiot, siis viivavirheet, etenevät kiteessä nimensä mukaisesti viivamaisina kokonaisuuksina. Heti alkuun on huomioitava, että dislokaatiot eivät ole pistemäisistä kidevirheistä muodostettuja sarjoja. Dislokaatiot ovat oma kidevirheen tyyppinsä. Dislokaatio voi syntyä esimerkiksi, kun yksi (tai mahdollisesti useampi) kiteen atomitasoista päättyy yllättäen ja tämän tason päälle muodostuu uusia atomitasoja. Tämänkaltaisen dislokaatio on nimeltään reunadislokaatio [17]. Mallikuva reunadislokaatiosta löytyy kuvasta 6.1a.

On olemassa myös muita dislokaation tyyppejä. Osa hilasta voi siirtyä sijoiltaan siten, että siirtymän ja syntyneen dislokaation suunnat ovat yhdensuuntaisia. Hilan alkuperäinen ja siirtynyt osa yhdistyvät tässä dislokaatiossa, jota kutsutaan ruuvidislokaatioksi [17]. Mallikuva ruuvidislokaatiosta löytyy kuvasta 6.1b.



(a) Reunadislokaatio

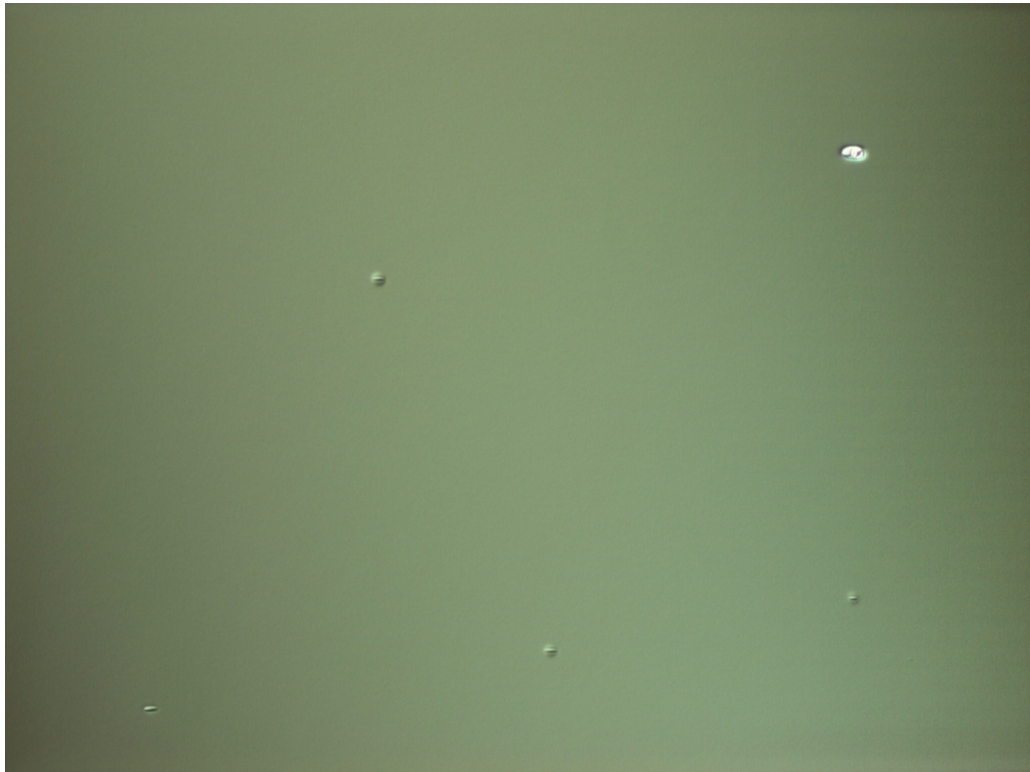


(b) Ruuvidislokaatio

Kuva 6.1 Mallikuvat reuna- ja ruuvidislokaatioista, lähdettä [18] mukaillen. Todellisuudessa dislokaatio voi omaksua usean tyypin piirteitä.

Kidevirheet vaikuttavat yleensä suoraan puolijohderakenteen ominaisuuksiin, esimerkiksi fotoluminesenssiin. Anomaliaita on kuitenkin mahdollista tutkia myös suoraan esimerkiksi mikroskoopin avulla. Pinnan ja kidevirheiden muodot saadaan helposti esille Nomarski-prismalla varustetulla mikroskoopilla [19]. Kuva 6.2 on otettu mikroskoopilla GaAs-pohjaisen näytteen pinnasta. Kuvan defektit ovat ovaaleja de-

fektejä, joista oikeassa yläkulmassa sijaitsevaan on alkanut kasvaa uutta kidettä ja keskellä oleviin liittyy kumpumaisuutta [19]. Ovaalit kidevirheet syntyvät esimerkiksi GaAs-oxidista, joka on jäänyt näytteen pinnalle [20]. Galliumoksidia voi esiintyä myös Ga-materiaalilähteessä uunin sisällä [21]. Myös kammion sisäseinistä irtoavat epäpuhtaudet voivat saada aikaan kidevirheitä.

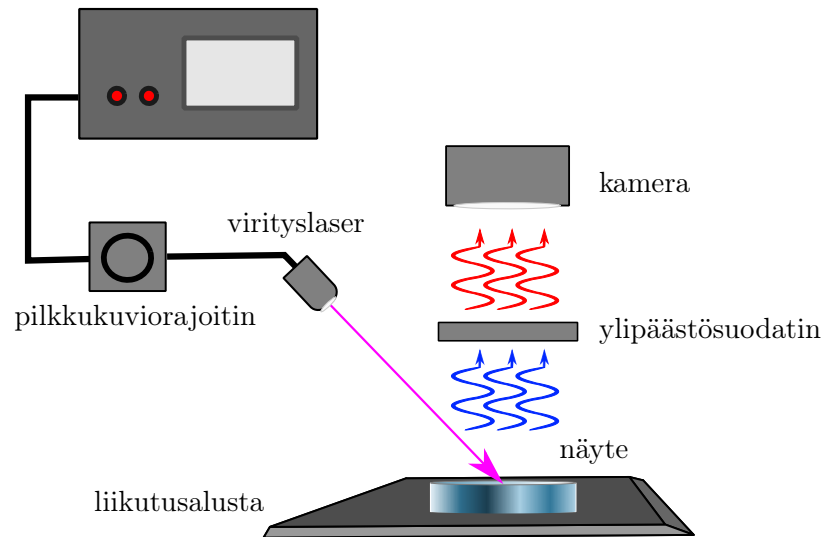


***Kuva 6.2** Kaksikymmentäkertainen suurennos GaAs-näytteen pinnasta. Näytteen pinnalla on ovaaleja defektejä.*

Vaikka kidevirheitä voidaan luokitella erilaisiin tyyppeihin, todellisuudessa kidevirheissä voi esiintyä piirteitä monenlaisista kidevirhetyypeistä. Esimerkiksi kiteen läpi kulkeva reunadislokaatio voi kääntyä kiteessä muuttuen samalla ruuvidislokaatioksi [17]. On siis selvää, että kidevirheiden tunnistaminen ei ole yksinkertaista työtä.

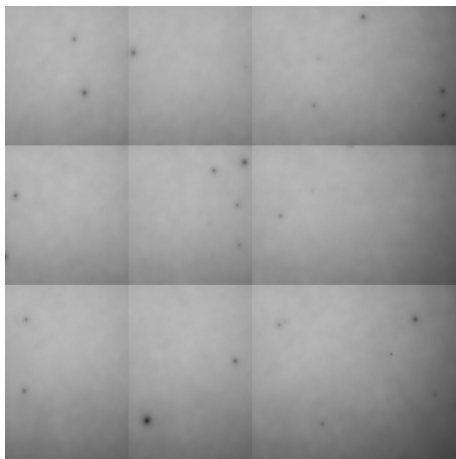
6.2 Tummat viat

Jos kidevirhe syntyy kerrokseen, jonka tarkoituksena on tuottaa valoa (VECSEL-vahvistinpeilin tapauksessa kvanttikaivon kohdalle), rakenteen luminesenssiominaisuudet voivat heikentyä tai hävitä kokonaan kidevirheen kohdalta. Tällaista kidevirhettä kutsutaan yleisesti tummaksi viaksi.

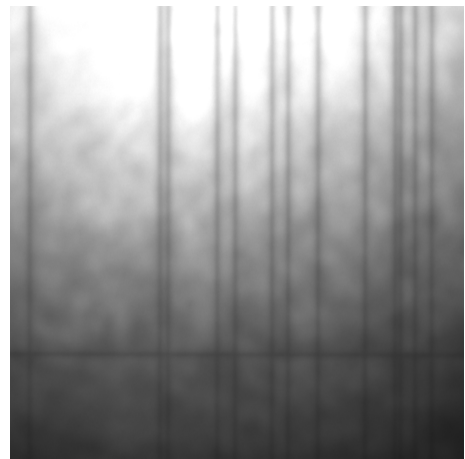


Kuva 6.3 Periaatekuva fotoluminesenssikartoitusmenetelmästä (mukaillen lähdettä [1]).

Tummia vikoja voidaan tutkia valaisemalla näytteen pintaa laservalolla. Fotonit luovat EHP:n vallikerroksessa, josta ne siirtyvät kvanttikaivoon. Tämän jälkeen aukko ja elektroni voivat rekombinoitua spontaanisti. Virittyminen on mahdollista myös muissa kerroksissa, esimerkiksi GaAs-kerroksissa. Luminoivasta rekombinaatiosta syntynyt luminesenssivalo kuvataan kameralla kuvan 6.3 periaatteen mukaisesti. Näytteestä saapunut valo suodatetaan ylipäästösuodattimella siten, että virityslaserin ja taustan valo eivät pääse kameralle. Menetelmästä käytetään nimitystä fotoluminesenssikartoitus. Kuvassa 6.4 on esitetty esimerkinomaisesti kaksi luminesenssikuvaa tummista pisteistä ja tummista viivoista.



(a)



(b)

Kuva 6.4 Fotoluminesenssikartoittimella otettuja esimerkkikuvia tummista vioista: (a) tummia pisteitä, (b) tummia viivoja

Kuvassa 6.4b nähdään selkeästi pilkkumaisia valon voimakkuuden vaihteluita. Tämä johtuu ilmiöstä, jota kutsutaan pilkkukuvioksi. Erittäin koherentti valo voi muodostaa pilkkukuvion (engl. speckle) poikkileikkaukseensa. Pilkkukuvio on rakeinen, satunnainen ja se vaihtelee ajan mukana [22]. Rakeet voivat olla tummia, kirkkaita, tai mitä tahansa tältä väliltä riippuen osasäteiden interferenssistä. Ilmiö johtuu vallitsevien olotilojen hyvin pienistä muutoksista, kuten laitteiston erittäin hienosta värinästä tai laseroinnissa ilmenevistä satunnaisilmiöistä [22].

Virityslaserista tullut valo muodostaa myös pilkkukuvion, joka näkyy kameran tallioimassa kuvassa. Pilkkukuvio voidaan poistaa (tai vähintään rajoittaa merkittävästi) esimerkiksi tärisyttämällä valokuitua, jossa valo kulkee, jolloin valon poikkileikkausprofiili ”sekoittuu” tasaiseksi (kuvan 6.3 pilkkukuviorajoitin perustuu tähän menetelmään).

7. YHTEENVETO

VECSEL on yksi joustavimpia laserratkaisuja muun muassa siksi, että sen vahvistinpeilin rakennetta on mahdollista muokata täyttämään sovelluskohteen tarpeita. Vahvistinpeilin lisäksi VECSELiä suunniteltaessa ja valmistettaessa tulisi huomioida sen toimintaan vaikuttavat muut osat: optiseen pumppaukseen tarvittava pumpulaser, vahvistinpeilin jäähdytys sekä kaviteetin rakenne ja mitoitus.

VECSEL-vahvistinpeilin valmistamisessa MBE-tekniikalla tulee huomioida useita tekijöitä. Jos kasvatusta ei suunnitella ja toteuteta huolellisesti, lopputuloksena saatu vahvistinpeili voi sisältää kidevirheitä, jotka todennäköisesti heikentävät vahvistinpeilin ominaisuuksia. Vahvistinpeilin analysoinnista tehtävät johtopäätökset auttavat parantamaan kasvatusprosessia.

Tämän kandidaatintyön ensimmäisenä tavoitteena on ollut, että allekirjoittanut tuottaa suppean simulaatoritarkaisun VECSELin toimintaan ja valmistamiseen liittyen. Toiseksi tärkeiksi tavoitteiksi luetellaan VECSELin toiminnan ja valmistamisen kuvaaminen.

Allekirjoittanut on kuvannut VECSELin toiminnan pääpiirteissä ja keskittynyt vahvistinpeilin toimintaan liittyvien ilmiöiden selittämiseen ja simulointiin. VECSEL-vahvistinpeilin valmistus MBE-tekniikalla on myös kuvattu ja siitä on muodostettu suppea ohje. Työn tärkein tuotos on Pythonilla kirjoitettu simulaatio-ohjelma, joka simuloi VECSELin tuottaman valon aallonpituutta kvanttikaivon paksuuden ja puolijohdekomposition mukaan. Lukija voi halutessaan tarkastella laserointisimulaattorin lähdekoodia liitteestä A. Lähdekoodin lukijaa kannustetaan tutustumaan myös *openbandparams*-kirjastoon.

Kandidaatintyön hyödyiksi osoittautui VECSELin tuottaman valon aallonpituuteen vaikuttavien tekijöiden kartoittaminen. Näistä tekijöistä kvanttikaivon paksuus ja puolijohdekompositio on kuvattu kvantitatiivisesti ja esimerkiksi kasvatukseen ja kidevirheisiin liittyvät tekijät kvalitatiivisesti.

Työ onnistui useassa mielessä. Työ perehdyttää lukijan VECSEL-vahvistinpeilien valmistukseen. Allekirjoittaneelle simulaattorin tekeminen osoittautui opettavaksi

kokemukseksi. Simulaattorista voisi tehdä vielä laajemman ohjelman, jossa olisi graafinen käyttöliittymä ja mahdollisuus säätää helposti useita parametrejä kerralla. Python oli hyvä valinta ohjelmointikieleksi, koska tämä mahdollisti avoimen lähdekoodin openbandparams-kirjaston käyttämisen. Pythonilla on lisäksi myös monia muita aiheeseen sopivia kirjastoja, joita mahdollisessa laajennuksessa voisi käyttää. Simulaation avulla kasvattaja voi suunnitella VECSEL-vahvistinpeilin toimintaa ja kasvatusta.

LÄHTEET

- [1] S. Ranta, *Wavelength Extension of Visible VECSELs by Structural Engineering*. Tampere University of Technology. Publication, Tampere University of Technology, 10 2014. Awarding institution:Tampere University of Technology.
- [2] J. G. McInerney, A. Mooradian, A. Lewis, A. V. Shchegrov, E. M. Strzelecka, D. Lee, J. P. Watson, M. K. Liebman, G. P. Carey, A. Umbrasas, C. A. Amsden, B. D. Cantos, W. R. Hitchens, D. L. Heald, and V. Doan, “Novel 980-nm and 490-nm light sources using vertical-cavity lasers with extended coupled cavities,” 2003.
- [3] V. Magni, “Multielement stable resonators containing a variable lens,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 4, pp. 1962–1969, Oct 1987.
- [4] “Rp photonics.” https://www.rp-photonics.com/resonator_modes.html. Accessed: 2018-01-15.
- [5] S. K. B. Ben Streetman, *Solid State Electronic Devices*. 6th ed., 2006.
- [6] E. Hecht, *Optics*. San Francisco: Addison Wesley, 4th ed., 2002.
- [7] H. A. Macleod, *Thin-Film Optical Filters*. CRC Press, 4th ed., 2010.
- [8] M. Polyanskiy, “Refractive index of gaas.” <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=GaAs&page=Aspnas>. Accessed: 2018-02-09.
- [9] R. Farrow, “1.2 molecular beam epitaxy,” 1995.
- [10] C. Tu, H. Dong, and N. Li, “Metal-organic molecular beam epitaxy (mombe) and laser-modified mombe of iii-v semiconductors,” *Materials Chemistry and Physics*, vol. 40, no. 4, pp. 260 – 266, 1995.
- [11] V. Kirchner, H. Heinke, U. Birkle, S. Einfeldt, D. Hommel, H. Selke, and P. L. Ryder, “Ion-induced crystal damage during plasma-assisted mbe growth of gan layers,” *Phys. Rev. B*, vol. 58, pp. 15749–15755, Dec 1998.
- [12] A.Y.Cho, “Recent developments in molecular beam epitaxy,” *Bell Laboratories*, Dec. 1978.
- [13] B. J. V. Zeghbroeck, “Temperature dependence of the energy bandgap.” <https://ecee.colorado.edu/~bart/book/eband5.htm>. Accessed: 2018-01-19.

- [14] R. wen Shao, K. Zheng, B. Wei, Y. fei Zhang, Y. jie Li, and X. dong Han, “Bandgap engineering and manipulating electronic and optical properties of zno nanowires by uniaxial strain,” *Nanoscale*, vol. 9, pp. 4397–4944, May 2014.
- [15] nanoHUB, “Schrödinger equation in 1d: The finite square well.”
- [16] “openbandparams.” <https://github.com/scott-maddox/openbandparams>. Accessed: 2017-07-18.
- [17] J. Blakemore, *Solid State Physics*. Cambridge University Press, 1985.
- [18] Y. Liao, “Globalsino,” 2006. Available: <http://www.globalsino.com/micro/1/1micro9984.html>.
- [19] M. Kaniewska and K. Klima, “Investigations of surface defects of gaas grown by molecular beam epitaxy,” *Materials Science and Engineering: B*, vol. 91—92, pp. 512–515, 2002.
- [20] G. D. Pettit, J. M. Woodall, S. L. Wright, P. D. Kirchner, and J. L. Freeouf, “Summary abstract: The mbe growth of gaas free of oval defects,” *IBM*, p. 2, Feb. 1984.
- [21] Y. G. Chai and R. Chow, “Source and elimination of oval defects on gaas films grown by molecular beam epitaxy,” *Applied Physics Letters*, vol. 38, no. 10, pp. 796–798, 1981.
- [22] J. W. Goodman, “Some fundamental properties of speckle*,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 66, pp. 1145–1150, Nov 1976.

LIITE A. VECSEL_LASING_SIMULATOR_V0.1

VECSEL_lasing_simulator.py

```

import os
import sys
sys.path.insert(0, os.path.abspath(os.path.join(
    os.path.dirname(__file__), '..../..')))

from openbandparams import *
from Ground_state import calculateGroundState
from math import pi

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy

# Definition of required variables
T_op = 300 # K
h_bar = 1.054571800 * 10 ** (-34) # Dirac's constant (Js)
m_e = 9.1093826*10**(-31) # electron rest mass (kg)
c = 299792458 # speed of light (m/s)

# Define the quantum well semiconductor materials and composition
barrier = AlGaAs(Al = 0.4, T = T_op)
q_well1 = AlGaAs(Al = 0.3, T = T_op)
q_well2 = AlGaAs(Al = 0.2, T = T_op)
q_well3 = AlGaAs(Al = 0.1, T = T_op)

# Save the heavy hole effective mass
m_hh1 = q_well1.meff_hh_100()*m_e
m_hh2 = q_well2.meff_hh_100()*m_e
m_hh3 = q_well3.meff_hh_100()*m_e

# Create strain (based on the substrate material) in the the layers
barrier = barrier.strained_001(GaAs)
q_well1 = q_well1.strained_001(GaAs)
q_well2 = q_well2.strained_001(GaAs)
q_well3 = q_well3.strained_001(GaAs)

```

```
# Definition and calculation of quantum well parameters
```

```
# Band gap energies
```

```
E_g1 = q_well1.Eg()
```

```
E_g2 = q_well2.Eg()
```

```
E_g3 = q_well3.Eg()
```

```
# Depth of quantum wells for electrons and holes
```

```
U_e1 = abs(barrier.CBO_Gamma() - q_well1.CBO_Gamma())
```

```
U_e2 = abs(barrier.CBO_Gamma() - q_well2.CBO_Gamma())
```

```
U_e3 = abs(barrier.CBO_Gamma() - q_well3.CBO_Gamma())
```

```
U_h1 = abs(barrier.VBO() - q_well1.VBO_hh())
```

```
U_h2 = abs(barrier.VBO() - q_well2.VBO_hh())
```

```
U_h3 = abs(barrier.VBO() - q_well3.VBO_hh())
```

```
# Electron masses
```

```
m_e1 = q_well1.meff_e_Gamma()*m_e
```

```
m_e2 = q_well2.meff_e_Gamma()*m_e
```

```
m_e3 = q_well3.meff_e_Gamma()*m_e
```

```
# Define the limits of the thickness values to be simulated
```

```
thickness = numpy.linspace(5*10**(-9), 10*10**(-9), 100)
```

```
# Calculate wavelengths for the chosen thickness values
```

```
wavelength1 = [(2 * pi * h_bar * c) / ((1.602176565 * 10 ** (-19))
    *(E_g1 + calculateGroundState(t, U_e1, m_e1, h_bar)
    + calculateGroundState(t, U_h1, m_hh1, h_bar)))
    for t in thickness]
```

```
# Convert wavelength list to correct variable type
```

```
wavelength1_np = numpy.array([])
```

```
for w in wavelength1:
```

```
    wavelength1_np = numpy.append(wavelength1_np, w)
```

```
wavelength2 = [(2 * pi * h_bar * c) / ((1.602176565 * 10 ** (-19))
    *(E_g2 + calculateGroundState(t, U_e2, m_e2, h_bar)
    + calculateGroundState(t, U_h2, m_hh2, h_bar)))
    for t in thickness]
```

```
wavelength2_np = numpy.array([])
```

```

for w in wavelength2:
    wavelength2_np = numpy.append(wavelength2_np, w)

wavelength3 = [(2 * pi * h_bar * c) / ((1.602176565 * 10 ** (-19))
    *(E_g3 + calculateGroundState(t, U_e3, m_e3, h_bar)
    + calculateGroundState(t, U_h3, m_hh3, h_bar)))
    for t in thickness]
wavelength3_np = numpy.array([])
for w in wavelength3:
    wavelength3_np = numpy.append(wavelength3_np, w)

# convert m into nm
thickness = thickness*(10**9)
wavelength1_np = wavelength1_np*(10**9)
wavelength2_np = wavelength2_np*(10**9)
wavelength3_np = wavelength3_np*(10**9)

# Create figure
fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot(111)
#plt.title('%s barrier (T = %.2g K)' % (barrier.name, T_op))
plt.title('$Al_xGa_{1-x}As$ kvanttikaivo (T= %.1f K)' % (T_op))
plt.xlabel('Paksuus (nm)')
plt.ylabel('Aallonpituus (nm)')

# Plot the simulation values
ax.plot(thickness, wavelength1_np, 'r-', label='$x=0.3$')
ax.plot(thickness, wavelength2_np, 'g—', label='$x=0.2$')
ax.plot(thickness, wavelength3_np, 'b:', label='$x=0.1$')

# Change plot font sizes
for item in ([ax.title, ax.xaxis.label, ax.yaxis.label]):
    # Next line is for adjusting the tick font sizes, if needed
    #+ ax.get_xticklabels() + ax.get_yticklabels():
    item.set_fontsize(18)
#ax.plot(xs, L, 'b:', label='$L$')
plt.legend(loc='best')

if __name__ == '__main__':

```

```
import sys
if len(sys.argv) > 1:
    output_filename = sys.argv[1]
    plt.savefig(output_filename)
else:
    plt.show()
```

Ground_state.py

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import fsolve
from math import pi
from math import tan
from math import sqrt

def calculateGroundState( L, U, m, h ):
    # First approximate the ground state by assuming infinite well
    E_approx = ((pi*h)**2)/(2*m*(L**2))*(6.24150913*10**18)

    # Find the numerical solution based on first approximation
    func = lambda E: (E/(U-E))*(tan(sqrt((m*E*(1.602176565*
        10**(-19))*(L**2))/(2*(h**2)))))**2)-1
    E_gs = fsolve(func, E_approx)
    return E_gs

```